

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

STRENGTH INCREASE OF CARBON STRUCTURAL STEELS AFTER STRUCTURE DEFORMATION REFINEMENT BY THE METHOD OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING

**М.В. Чукин, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова,
О.А. Никитенко, М.П. Барышников***
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
Россия, m.chukin@mail.ru

Special features of microstructure formation which determine mechanical properties during the equal channel angular pressing of carbon structural steel 20 and 45 are investigated. The dependences of steel strength and plastic characteristics on the deformation degree are obtained and influence of deformation degree on fracture form is revealed. The quantitative parameters of elements of ultrafine-grain structure are determined. On the obtained basis dependences between quantitative characteristics of microstructure and mechanical properties of carbonaceous steel of 20 and 45 formed during ECAP are built.

В последние годы заметно возросло внимание исследователей к получению и использованию ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, что объясняется реальными возможностями практического применения их полезных свойств в разнообразных отраслях науки и техники [1-3 и др.]. Развитие промышленности и строительства в России в настоящее время предъявляет все более высокие требования к прочностным характеристикам материалов, используемых для изготовления деталей и конструкций, работающих в напряженных состояниях. Распространенным способом улучшения их механических свойств является создание сложных высоколегированных сталей и сплавов и применение упрочняющей термической обработки, что, в конечном итоге, приводит к существенному удорожанию продукции, которое не всегда оправдано. Поэтому получение УМЗ состояния в недорогих углеродистых сталях является актуальной задачей современного металлостроения, поскольку позволяет, благодаря созданию повышенных прочностных свойств в них, значительно расширить класс конструкционных материалов.

Одним из наиболее эффективных методов деформационного получения УМЗ структуры с размером зерна менее 1000 нм является равноканальное угловое прессование (РКУП), основанное на деформации простым сдвигом при постоянстве начальных и конечных сечений. Этот метод исключает конечное формоизменение заготовки и обеспечивает большие степени деформации без разрушения материала. Как один из способов обработки металлов давлением, РКУП можно использовать для получения различных стальных полуфабрикатов в виде прутков, проволоки и т.д., предназначенных, в частности, для изготовления различного вида продукции метизного производства, обладающей улучшенным комплексом механических свойств [4, 5]. Перспективы практического использования сталей с

УМЗ структурой требуют более полных сведений, как об их механических свойствах, так и о механизмах формирования этих свойств. Особенно это относится к низко- и среднеуглеродистым сталям, поскольку в таких сталях получение одновременно высокой прочности в сочетании с хорошей пластичностью традиционными методами упрочнения весьма затруднительно. Между тем, несмотря на достаточно большое количество публикаций по тематике, связанной с исследованием структуры и свойств УМЗ металлов, процессы и механизмы их формирования при РКУП остаются до сих пор недостаточно изученными.

В связи с выше сказанным актуальным является выявление закономерностей структурных изменений в низко- и среднеуглеродистых сталях в ходе единичного цикла деформирования при РКУП, а также установление связей между степенью деформации и структурным состоянием материала, т.к. это позволило бы существенным образом продвинуться в понимании протекающих процессов и прогнозировать комплекс механических свойств заготовки, полученной методом РКУП. Внедрение новых технологий производства металлических изделий с использованием метода РКУП позволит достичь высокого качества выпускаемой продукции.

В работе представлены результаты исследования закономерностей структурообразования и формирования механических свойств в ходе РКУП углеродистой конструкционной стали марок 20 и 45 с различным соотношением феррита и пластинчатого перлита в исходной структуре.

* Авторы выражают признательность И.Л. Яковлевой и В.А. Шабашову (Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург) за сотрудничество в проведении исследований

Процесс РКУП реализовывался по известной схеме [1] в условиях Института физики перспективных материалов ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на образцах диаметром 20 мм и длиной 120 мм. Заготовка при 400 °С продавливалась через специальную оснастку в виде двух пересекающихся под углом 120°. Количество проходов изменялось от одного до восьми с поворотом образца вокруг продольной оси на 90° после каждого прохода, что обеспечивало изменение направления сдвига. Степень деформации ε рассчитывалась по формуле, рекомендованной для случая, когда внешний угол пересечения каналов в используемой оснастке равен нулю [1]: $\varepsilon = N \cdot (2/\sqrt{3}) \cdot \text{ctg}(\varphi/2)$, где N – число проходов, φ – внутренний угол пересечения каналов. В данном случае $\varphi = 120^\circ$, тогда $\varepsilon_1 \approx 0,7$; $\varepsilon_2 \approx 1,3$; $\varepsilon_3 \approx 2,0$; $\varepsilon_4 \approx 2,7$; $\varepsilon_8 \approx 5,3$.

Микроструктура исследовалась с помощью светового микроскопа Meiji Techno. Растровый электронно-микроскопический (РЭМ) анализ выполнялся на микроскопе JSM-6490LV при ускоряющем напряжении 30 кВ. Просвечивающий электронно-микроскопический (ПЭМ) анализ проводили в условиях Центра коллективного пользования Института физики металлов УрО РАН на микроскопе JEM-200CX при ускоряющем напряжении 160 кВ.

Для осуществления количественного анализа микроструктуры в связи с малым размером структурных элементов с помощью программной среды Thixomet PRO были проанализированы РЭМ изображения структуры с последующей статистической обработкой результатов измерений, при этом объем выборки на каждом этапе составил от 100 до 500 единиц. По результатам измерения были построены частотные кривые плотности распределения, по которым находили параметры распределения и средние значения размеров исследуемых элементов микроструктуры.

Микротвердость определяли в соответствии с ГОСТ 9450-60 на твердомере Buchler Mikromet методом вдавливания алмазной пирамидки с углом между противоположными гранями 136°. Испытания механических характеристик осуществлялись путем испытаний на растяжение и ударный изгиб в соответствии с ГОСТ 1497-2000 и ГОСТ 9454-78. Доля вязкой составляющей в изломах находили с использованием стереомикроскопа Meiji Techno и системы Thixomet PRO.

Микроанализ показал, что в исходной структуре стали марки 20 размер зерен феррита составил в среднем 21,8 мкм, а межпластиночное расстояние в перлите – 0,32 мкм. В стали 45 эти характеристики составляли 22,8 и 0,68 мкм, соответственно. Объемная доля перлита в стали марок 20 и 45 составляла 24 и 60 % (рис. 1, а, д), а средняя микротвердость HV200 – 2122 и 2526 МПа, соответственно.

На начальных этапах обработки РКУП при одном-трех проходах (степень деформации $\varepsilon \approx 0,7-2,0$) структура в центре и на периферии сечения различается, но с увеличением числа проходов свыше четырех ($\varepsilon \geq 2,7$) становится более однородной. Перлитные зерна при одном-трех проходах РКУП практически не меняют свою форму и размеры, но при количестве проходов свыше четырех приобретают изогнутую форму (рис. 1).

Начиная с первого прохода РКУП ($\varepsilon \approx 0,7$), в исходных зернах феррита образуются деформационные полосы (рис. 2, а, д), подобно полосовым структурам, которые возникают при традиционных способах деформации со степенями $\varepsilon \leq 3-4$. Их формирование наблюдалось рядом исследователей в алюминии, меди и во многих других металлах после одного прохода прессования со степенью деформации $\varepsilon \approx 1$, а также в металлических дисках при кручении под давлением.

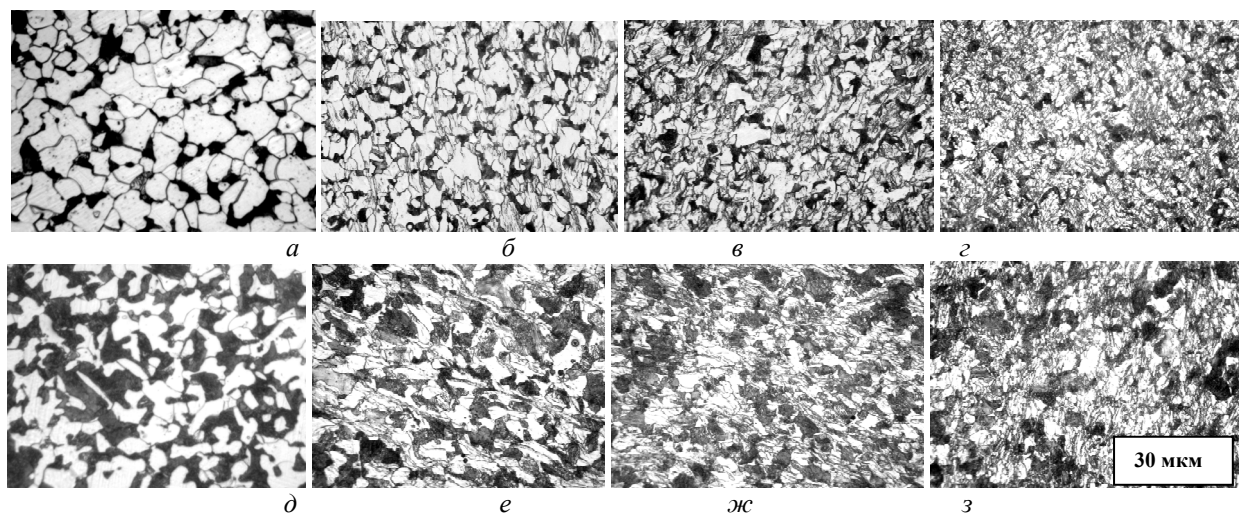


Рис. 1. Микроструктура стали марки 20 (а-г) и 45 (д-з) до РКУП (а, д) и после одного (б, е), двух (в, ж) и четырех (г, з) проходов РКУП, х 500

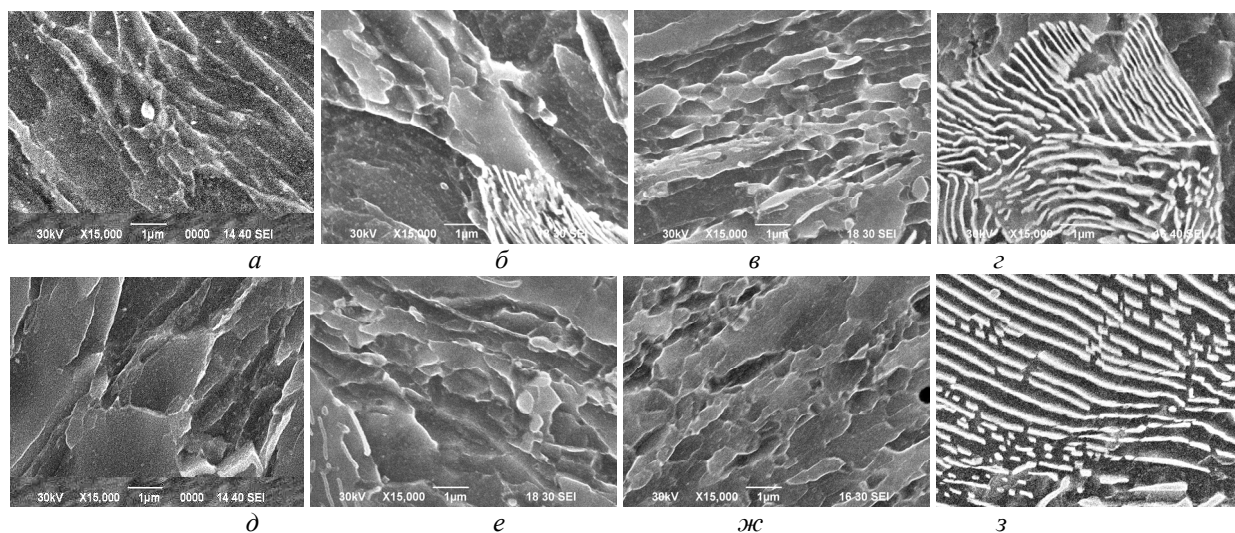


Рис. 2. Микроструктура ферритной составляющей (а-в, д-ж) и перлита (з, з) стали марки 20 (а-г) и 45 (д-з) после одного (а, д), двух (б, е) и четырех (в, ж, з, з) проходов РКУП

Одновременно прослеживается разбие-ние деформационных полос и исходных микро-мелких (так называемых «чистых») зерен ферри-та на более мелкие по размерам области (рис. 2, а-в, д-ж). Обнаружено, что уже на начальных этапах обработки в один-два прохода РКУП ($\epsilon \approx 0,7-1,3$) эти области имеют вид ультрамелких зерен равноосной формы с тонкими прямолиней-ными границами и равновесными углами в трой-ных стыках. Специфическими особенностями та-кой микроструктуры является образование при од-ном-двух проходах РКУП ($\epsilon \approx 0,7-1,3$) в деforma-ционных полосах (рис. 3, а, б) и микромелких («чистых») зернах (рис. 3, в, г) феррита широких дислокационных границ, с высокой плотностью

дислокаций, многие из которых отдельно неразре-шимы. Эти границы делят полосу или зерно на бо-лее мелкие объемы – субзерна (ячейки) с неболь-шими разориентировками, внутри которых плот-ность дислокаций понижена. Об этом свидетельст-вует азимутальное размытие рефлексов на электро-нограммах (рис. 3, а, 4, а и 5, а) и темнопольный анализ изображений. Таким образом, развивается деформационное измельчение (или по терминологи-и ряда авторов фрагментация) структуры, заклю-чающаяся в разбиении исходных зерен на ячейки (фрагменты), разориентированные на небольшие углы [6, 7].

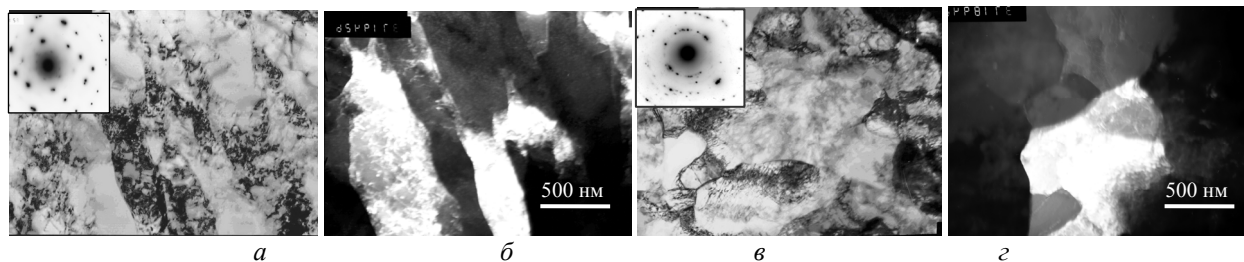


Рис. 3. Субзеренная структура феррита в стали марки 20 после одного ($\epsilon \approx 0,7$) и двух ($\epsilon \approx 1,3$) проходов РКУП: а, в – светлопольные изображения и электронограммы; б, г – темнопольные изображения в ферритных рефлек-сах

Однако, уже на начальном этапе обработки (при втором проходе РКУП, $\epsilon \approx 1,3$) формируются и новые ультрамелкие зерна равноосной формы с тонкими, четкими прямолинейными границами с характерным экстинкционными контурами и рав-новесными углами в тройных стыках (рис. 4, б), что свидетельствует о формировании большеугловых границ. Это отличается от результатов исследова-

ний ряда авторов [8-11], выполненных на меди, алюминии, никеле и других чистых металлах, в которых было показано, что при первых проходах РКУП ($\epsilon < 1$) формируется только субзеренная микроструктура с малыми угловыми разориенти-ровками.

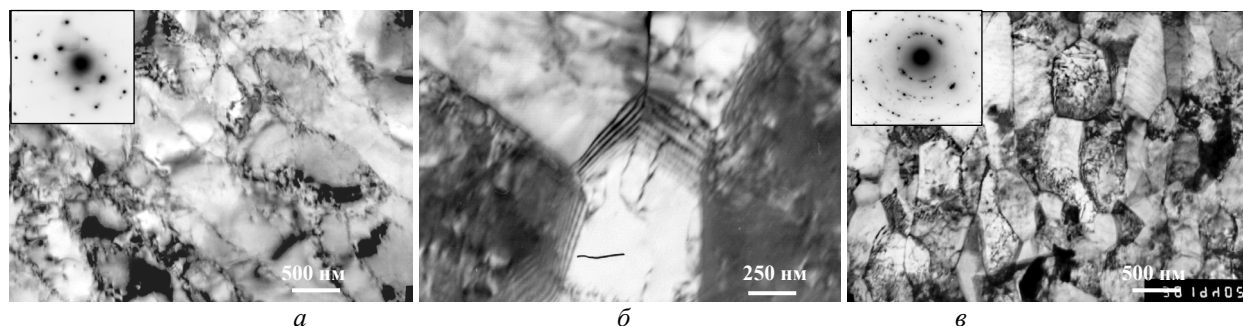


Рис. 4. Особенности тонкого строения ферритной составляющей стали марки 20 после РКУП: *а* – один ($\epsilon \approx 0,67$), *б* – два ($\epsilon \approx 1,33$), *в* – восемь ($\epsilon \approx 5,64$) проходов

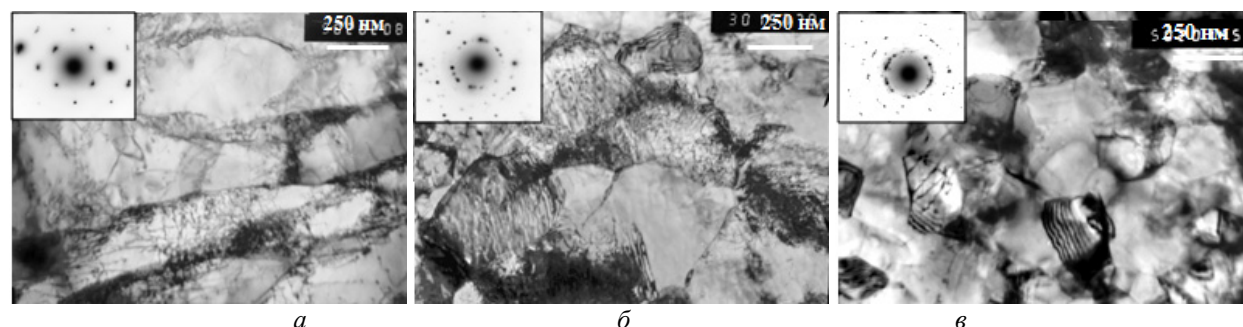


Рис. 5. Субзеренная и УМЗ структуры в стали марки 45 после РКУП: *а* – один ($\epsilon \approx 0,67$), *б* – три ($\epsilon \approx 2,00$), *в* – восемь ($\epsilon \approx 5,64$) проходов

По мере увеличения степени деформации происходит трансформация субзеренных границ (рис. 4, 5). Стенки ячеек становятся более узкими и прямолинейными, появляются зерна, полностью очищенные от дислокаций и окруженные узкими и тонкими границами, с характерным экстинкционными контурами. Возникающие ультрамелкие ферритные зерна имеют различные ориентировки, о чем свидетельствует расшифровка электронограмм.

При увеличении количества проходов более четырех (при $\epsilon > 2,7$) равноосная «зеренная» структура становится преобладающей и формируется УМЗ структура с размерами зерен от 200 до 500 нм преимущественно с большеугловыми границами (рис. 4, в, 5, в). Общее число рефлексов на электронограммах увеличивается, они приобретают кольцевое строение с более равномерным распределением их по окружностям, характерное для множества ориентировок.

Эти результаты были подтверждены прямыми измерениями углов разориентировки зерен, которые были выполнены на сканирующем микроскопе методом EBSD (дифракции обратно рассеянного

электронов). Они продемонстрировали наличие большеугловых разориентировок микрообластей кристалла друг относительно друга и показали, что после четырех проходов РКУП ($\epsilon \approx 2,7$) около половины формирующихся ультрамелких зерен имеет разориентировки от 30 до 50°.

В перлите в процессе РКУП происходит уменьшение межпластиночного расстояния, изгиб, разрушение цементитных пластин чистым срезом и их дробление на блоки (рис. 2, з, з). Установлено также, что в стали 20 при количестве проходов свыше четырех, а в стали 45 уже при первом проходе ферритные пластины перлита также разбиваются на субзерна (рис. 6, а, б). В цементитных пластинках образуются ферритные прослойки (так называемые «ферритные мостики»), которые, развиваясь, начинают смыкаться и перерезают пластинку, что подтверждается темнопольными изображениями в ферритном рефлексе. В результате цементитные пластины дробятся на отдельные части (блоки) (рис. 6, в, з), что также подтверждает темнопольный анализ в рефлексе

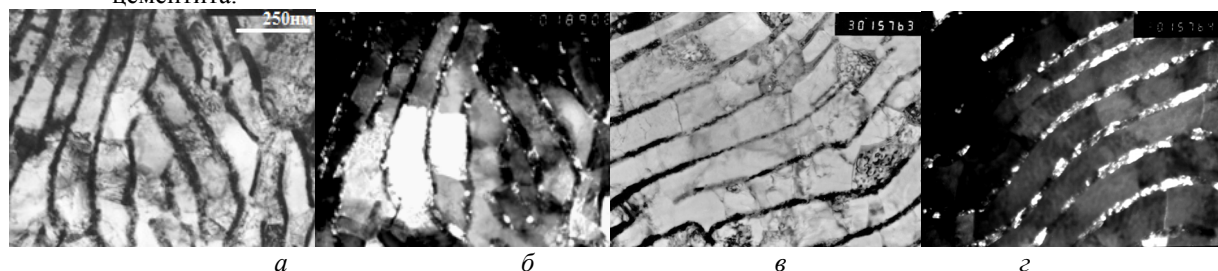


Рис. 6. Тонкое строение перлита в стали марки 20 после четырех проходов РКУП ($\epsilon \approx 2,67$): *а, в* – светлоскопические изображения; *б, з* – темнопольные изображения в ферритном и цементитном рефлексах

Количественный анализ показал [11, 12], что среднее значение ширины деформационных полос существенно уменьшается от 800 до 350 нм только при 1-2 проходах РКУП, а размер фрагментов (зерен) – от 800 до 500 нм, в дальнейшем практически не меняясь. При этом, как свидетельствует дисперсионный анализ результатов измерений, распределение размеров всех структурных элементов становится более однородным.

Объемная доля деформационных полос в обеих марках стали также интенсивно возрастает при первом проходе РКУП ($\epsilon \approx 0,7$), а затем увеличивается, но в меньшей степени (рис. 7). Поскольку толщина полос при этом остается практически неизменной, это означает, что вклад в деформационное измельчение структуры деформационные полосы вносят только при первом проходе.

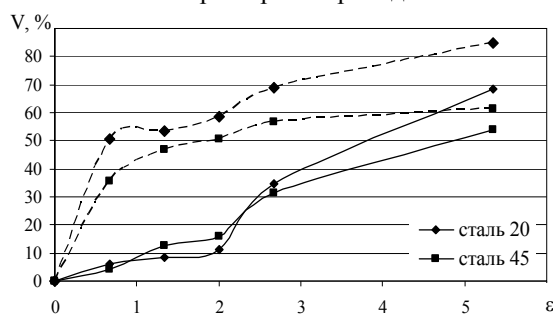


Рис. 7. Изменение объемной доли деформационных полос (пунктирные линии) и фрагментированного феррита (сплошные линии) в стали марок 20 и 45 в зависимости от степени деформации при РКУП

Наоборот, объемная доля фрагментированного феррита при первом проходе невелика и при возрастании степени деформации непрерывно увеличивается, особенно, начиная с четвертого прохода (при $\epsilon \geq 2,7$). Поскольку размеры фрагментов (зерен) феррита при этом практически не уменьшаются, это доказывает, что деформационное измельчение структуры в процессе РКУП в отличие от традиционных способов ОМД осуществляется не за счет измельчения уже образовавшихся фрагментов (зерен), а за счет дальнейшего увеличения их количественной доли в структуре.

Полученные количественные зависимости подтверждают, что после четырех проходов РКУП ($\epsilon \geq 2,7$) в структуре углеродистых конструкционных сталей начинает превалировать не полосовая, а равноосная субзеренно-зеренная структура. Это является основным отличием процессов, происходящих при РКУП, от измельчения структуры при традиционных видах ОМД.

Известно, что при пластической деформации сталей с перлитной структурой цементит распадается и увеличивается концентрация углерода в ферритной составляющей, в результате наблюдается эффективное упрочнение сплавов [13-15]. Было установлено [16], что полное растворение части цементитной пластины вблизи субзерен феррита происходит при $\epsilon \geq 30\%$.

Результаты ПЭМ анализа, выполненного в данной работе, позволяют сделать предположение, что частичное растворение цементита в углеродистой ферритно-перлитной стали происходит и при деформационном воздействии методом РКУП. Это было подтверждено результатами ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС), которую проводили в Институте физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург). Характер спектров (рис. 8) свидетельствует, что после воздействия РКУП уменьшается площадь под пиками, отвечающими секстету цементита. При этом интенсивность снижается на $\sim 30\%$. Одновременно увеличивается интенсивность под сателлитом *B*, отвечающим за координацию атомов железа в соседстве с углеродом в твердом растворе. Полученные результаты позволяют утверждать, что деформация методом РКУП приводит к частичному растворению цементита и переходу углерода в ферритную матрицу, аналогично результатам сдвига под давлением в стали У13 [17].

Деформационное измельчение структуры привело к существенному изменению механических свойств исследуемых сталей [18, 19]. С увеличением степени деформации при РКУП микротвердость по сравнению с исходным состоянием возрастает примерно в 1,5 раза (в стали марки 20 – на 49 %, в стали марки 45 – на 46 %). Возрастает также временное сопротивление и предел текучести, а относительное удлинение, относительное сужение уменьшаются (рис. 9). При этом в низкоуглеродистой стали марки 20 возможно получить прочностные характеристики, приближающиеся к прочностным характеристикам среднеуглеродистой стали марки 45: после четырех проходов временное сопротивление σ_B стали марки 20 составляет 843, а в стали марки 45 – 922 Н/мм² (в исходном состоянии эти величины составляют 470 и 621 Н/мм², соответственно).

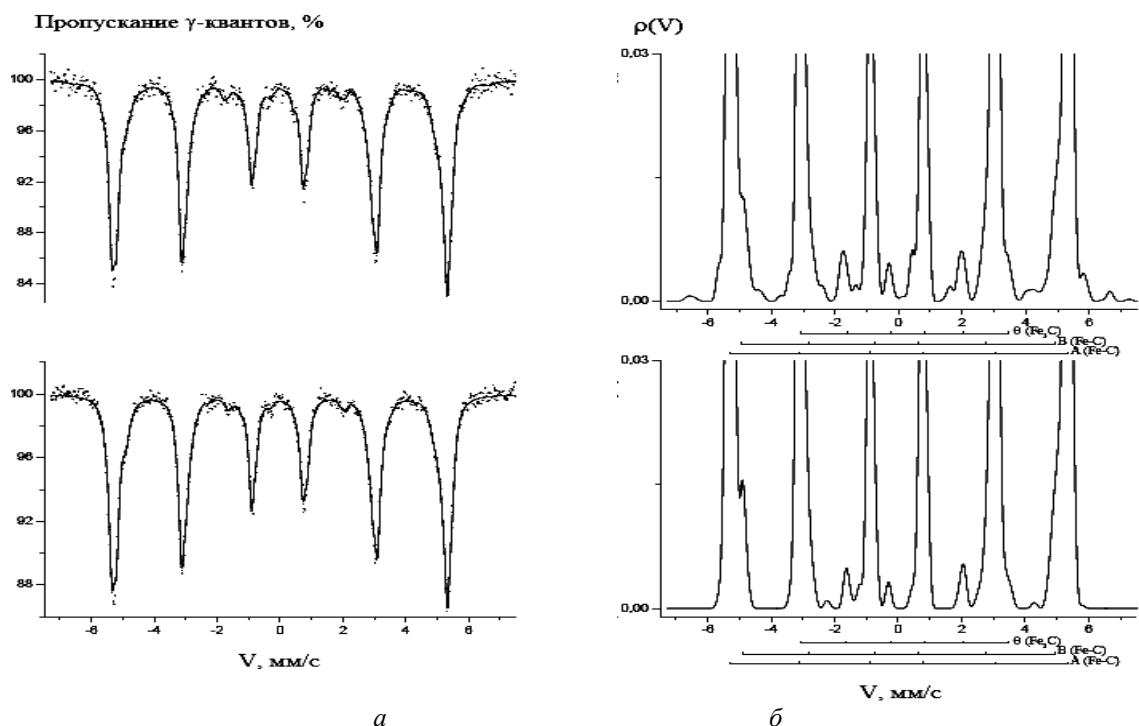


Рис. 8. Мессбауэровские спектры (а) и функции распределения (б) в образцах стали марки 45 до РКУП (вверху) и после восьми проходов РКУП (внизу)

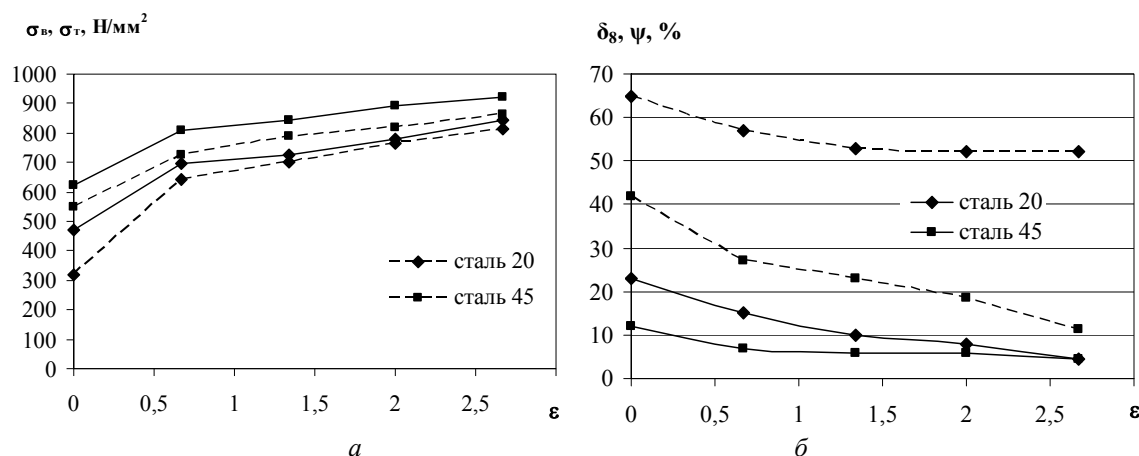


Рис. 9. Изменение временного сопротивления σ_b (сплошные линии), предела текучести σ_t (пунктирные линии), относительного удлинения δ_8 (сплошные линии) и относительного сужения ψ (пунктирные линии) стали марок 20 и 45 в зависимости от общей степени деформации ϵ при РКУП

Анализ зависимостей механических свойств от параметров микроструктуры показал, что основное влияние на упрочнение стали при ее обработке методом РКУП, наряду с уменьшением межпластинчатого расстояния в перлите и формированием деформационных полос, оказывает фрагментация феррита (рис. 10).

Фрактографические исследования поверхности разрушения после испытаний на ударный изгиб, выполненные с помощью РЭМ, показали, что в процессе РКУП наблюдается смена

механизма разрушения: в стали марки 20 – от вязкого к хрупкому после первого прохода, и затем – вновь к вязкому, а в стали марки 45 – от хрупкого к вязкому (рис. 11). При увеличении количества проходов более трех ($\epsilon > 2$) излом во всех случаях имеет ямочное строение, характерное для вязкого разрушения. Эти результаты подтверждаются полученными данными по определению доли вязкой составляющей в изломах.

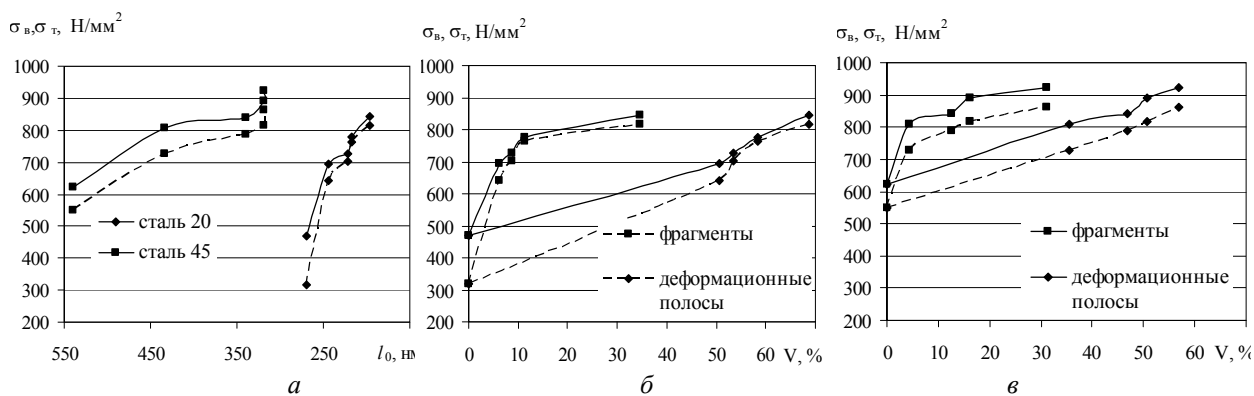


Рис. 10. Влияние межпластинчатого расстояния l_0 в перлите (а) объемной доли V фрагментированного феррита и деформационных полос в сталях марок 20 (б) и 45 (в) на временное сопротивление σ_B (сплошные линии) и предел текучести σ_T (пунктирные линии)

Для подтверждения полученных результатов в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» из калиброванного проката, предварительно подвергнутого РКУП, методом холодной высадки

были изготовлены и испытаны в соответствии с ГОСТ Р 52643-2006 болты диаметром 16 мм из стали марок 20 и 45, что подтверждено актами промышленных испытаний.

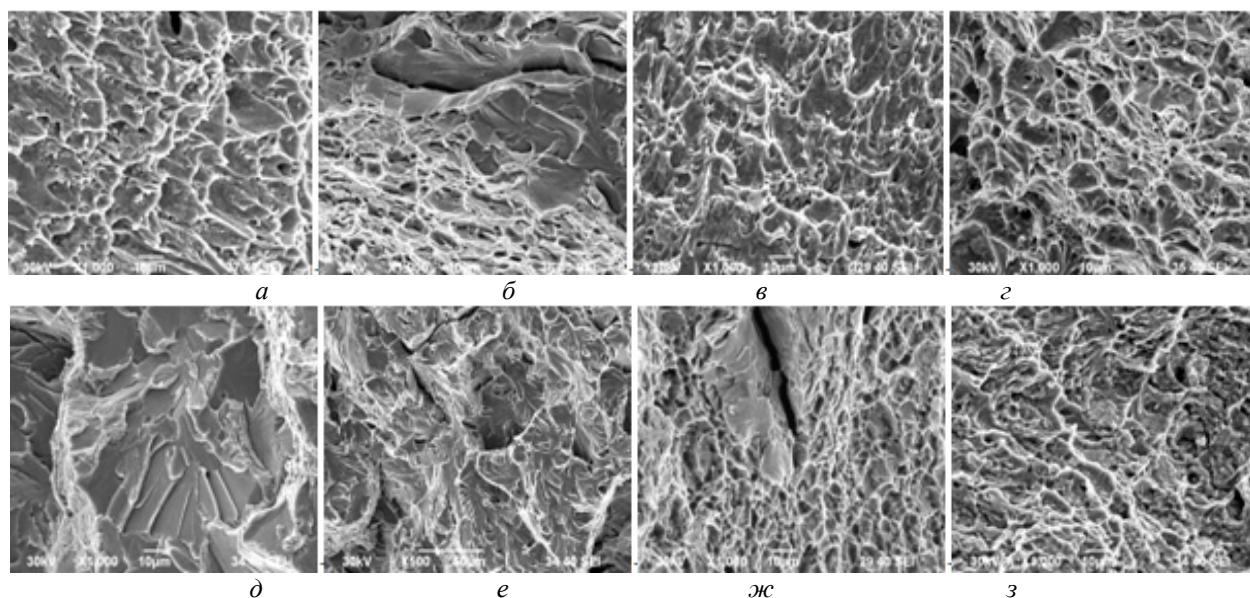


Рис. 9. Поверхность разрушения при испытаниях при комнатной температуре ударных образцов стали 20 (а-г) и стали 45 (д-з) до РКУП (а, д) и после РКУП в один (б, е), два (в, ж) и три (г, з) прохода

Они показали, что использование процесса наноструктурирования сталей методом РКУП может существенно повысить класс прочности болтов: болт, изготовленный из стали марки 20, имел класс прочности 6.8 и $\sigma_B = 686 \text{ Н/мм}^2$, а болт из стали марки 45 – класс прочности 8.8 и $\sigma_B = 873 \text{ Н/мм}^2$, что труднодостижимо получить на исследуемых марках стали традиционными методами обработки. Результаты работы использованы также при разработке и опробовании новых технологий производства высокопрочной продукции метизного производства различного назначения с повышенным уровнем потребительских свойств, что подтверждается актами внедрения результатов научно-исследовательских работ.

Заключение.

Полученные зависимости характеристик механических свойств от общей степени дефор-

мации и от размеров элементов УМЗ структуры, формирующихся в процессе РКУП, позволяют прогнозировать комплекс механических свойств углеродистой конструкционной стали марок 20 и 45 при деформационном воздействии этим методом.

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 13.G25.31.0061), программы стратегического развития университета на 2012 – 2016 гг. (конкурсная поддержка Минобрнауки РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО), а также гранта в форме субсидии на поддержку научных исследований (соглашение № 14.B37.21.0068).

Библиографический список

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Борисова М.З. Структура, свойства и особенности разрушения низколегированной стали в субмикроструктурном состоянии // Металлы. 2006. № 4. С. 51-55.
3. Добаткин С.В., Одесский П.Д., Пиппан Р.И. др. Теплое и горячее равноканальное угловое прессование низкоуглеродистых сталей // Металлы. 2004. № 1. С. 110-119.
4. Чукин М.В., Копцева Н.В., Барышников М.П., Ефимова Ю.Ю., Носов А.Д., Носков Е.П., Коломиец Б.А. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2009. № 2 (26). С. 64-68.
5. Гун Г.С., Чукин М.В., Емалеева Д.Г., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П. Исследование формирования субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 3 (26). С. 84-87.
6. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2010. Том 20. № 1. С. 7-25.
7. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
8. Ахмадеев Н.А., Валиев Р.З., Копылов В.И. и др. Формирование субмикроструктурной структуры в меди и никеле с использованием интенсивного сдвигового деформирования // Металлы. 1992. № 5. С. 96-101.
9. Эфрос Б.М., Попова Е.В. Эфрос., В.А. и др. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и упрочнение поликристаллического никеля // Металлы. 2005. № 6. С. 31-35.
10. Кайбышев Р.О., Мазурина И.А., Громов Д.А. Механизмы измельчения зерен в алюминиевых сплавах в процессе интенсивной пластической деформации // МТМ, 2006. № 2. С. 14-19.
11. Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А. Количественный анализ микроструктуры углеродистых сталей марок 20 и 45, наноструктурированных методом равноканального углового прессования // Обработка сплошных и слоистых материалов. Вып. 36: Межвуз. сб. науч. тр. Под ред. М.В. Чукина. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – С. 138-145.
12. Копцева Н.В., Чукин М.В., Никитенко О.А. Использование программного продукта Thixomet Pro для количественного анализа ультрамелкозернистой структуры низко- и среднеуглеродистой стали, подвергнутой равноканальному угловому прессованию. - МТМ 2012, № 8.
13. Белоус М.В., Черепин В.Т. Изменения в карбидной фазе стали под влиянием холодной пластической деформации // ФММ. 1962. Т.14. Вып. 1. С. 48-54.
14. Гринев В.Н., Гаврилюк В.Г. Распад цементита при пластической деформации стали // Металлофизика. 1982. Т. 4. № 3. С.74-87.
15. Целлермаер В.Я. Субструктурно-фазовые превращения при интенсивной пластической деформации металлов // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. № 12. С. 44-49.
16. Счастливцев В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л. и др. Перлит в углеродистых сталях. – Екатеринбург: УрО РАН. 2006. – 311 с.
17. Shabashov V.A., Korshunov L.G., Mukoseev A.G., Sagaradze V.V., Makarov A.V., Pilyugin V.P., Novikov S.I., Vildanova N.F. Deformation-induced phase transitions in a high-carbon steel // Mat.Sci.Eng., A346 (2003). P. 196-207.
18. Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П. Формирование механических свойств углеродистой конструкционной стали в процессе равноканального углового прессования // Метизы. 2010. № 6 (61). С. 16-21.
19. Chukin M.V., Koptseva N.V., Efimova J.J., Nikitenko O.A., Polyakova M.A. Criterion estimation of severe plastic deformation efficiency from the position of their influence on the carbon steel structures evolution // CIS Iron and Steel Review. 2010. P. 28-31.

Сведения об авторах

Копцева Наталья Васильевна

г. Магнитогорск, ул. Горького 26, кв. 29, 455000, Россия,
Паспортные данные: сер. 7501 № 055262, выдан
ОВД Ленинского р-на г. Магнитогорска Челяб. обл.
25.01.2002 г.
E-mail: koptsev2002@mail.ru, тел. (3519) 29-85-67,
89090951861

Ефимова Юлия Юрьевна

г. Магнитогорск, ул. Горького 28, кв. 36, 455000, Россия,
E-mail: jefimova@mail.ru, тел. (3519) 29-84-81,
89068710796

Барышников Михаил Павлович

г. Магнитогорск, ул. Горького 27, кв. 51, 455000, Россия,
E-mail: arcsmag@mail.ru, тел. (3519) 29-84-81,
83519066428

Никитенко Ольга Александровна

г. Магнитогорск, ул. Советская 182, кв. 52, 455037, Россия
Паспортные данные: сер. 7506 № 015571, выдан
УВД Орджоникидзевского р-на, г. Магнитогорска,
Челяб. обл. 12.02.2007 .
E-mail: olganikitenko@list.ru. , тел.+79514555649

Чукин Михаил Витальевич

г. Магнитогорск, ул. Горького 28, кв. 36, 455000, Россия
Паспортные данные: сер. 7509 № 556181, выдан отделением № 3 УФМС России по Челябинской обл. в Ленинском р-не г. Магнитогорска 09.09.2009 г.
Год рождения: 1964 г.
E-mail: M.Chukin@mail.ru, тел. раб. (3519) 29-85-26;
сот. +73519003426